

Digitala tvillingar och metaversum för försvar och säkerhet

Roger Bodén och Cecilia During

En digital tvilling är en digital representation av en målenhet med datakopplingar som möjliggör konvergens mellan de fysiska och digitala tillstånden med en lämplig synkroniseringstakt. Målenheten kan utgöras av exempelvis en process, en komponent eller ett system. Den digitala tvillingen kan användas som ett verktyg i en produkts hela livscykel och som beslutsstöd för den fysiska motsvarigheten för predikterade händelser eller simulerade utfallsrum. Metaversum är en samlingsterm för interaktiva virtuella världar. Digitala tvillingar kan sättas in i ett metaversum för att genomföra interaktioner som av olika anledningar, exempelvis stor risk eller hög kostnad, inte är fördelaktiga att genomföra i verkligheten.

I TAKT MED ATT de möjliggörande teknikerna utvecklas kommer digitala tvillingar och metaversum gradvis bli mer avancerade och omfattande. Från att bara fokusera på viktiga komponenter i en produkt kommer digitala tvillingar att kunna omfatta hela system-av-system. Genom möjligheten att simulera olika utfallsrum utifrån olika handlingsalternativ kan beslutsfattare få stöd i att välja bland de mest optimala handlingsalternativen. På lång sikt förväntas digitala tvillingar och metaversum också bli mycket användbara verktyg för multidomänoperationer (MDO).

Rekommendationer till Försvarsmakten är att först identifiera tydliga militära behov och konkretisera den förväntade nyttan samt initialt fokusera på lågt hängande frukt för att snabbt komma igång. Därefter rekommenderas att hantera säkerhetsfrågor och initiera etablering av infrastruktur parallellt. Här blir det också viktigt att se över frågor som kravställning, standardisering, interoperabilitet samt validering och ackreditering.

BAKGRUND

Avskanning av forskningsfronten är ett projekt vid Totalförsvarets forskningsinstitut (FOI) som bland annat syftar till att ta fram översikter med olika bredd och djup inom utvalda teknikområden, som en del av ett beslutsunderlag för hur dessa kan hanteras av Försvarsmakten

och FOI. Tillsammans med Försvarsmakten identifierar och beslutar FOI vilka teknikområden som behöver behandlas. Föreliggande arbete har syftat till att göra en bred översikt för två sammanhängande teknikområden som valts ut, nämligen digital tvilling (*digital twin*, DTw) och metaversum (*metaverse*) (1). Målet har varit att svara på följande frågor kring dessa områden:

- Vad omfattas av begreppen och hur definieras de?
- Vilka är tillämpningarna och hur ser forskningsfronten ut inom försvar och säkerhet?
- Vad behöver svensk försvarssektor, särskilt Försvarsmakten, prioritera för att kunna ta tillvara på fördelarna?

För att besvara frågorna har såväl explorativa litteratursökningar som strukturerade litteratursökningar av vetenskaplig litteratur genomförts, baserat på tidigare beskriven fyrstegsprocess (2). Kompletterande information har inhämtats genom deltagande i en workshop arrangerad av studien Explore Defence Digital Twins (EDDI) initierad av Europeiska försvarsbyrån. Slutligen arrangerade författarna en workshop med 19 deltagare från FOI, Försvarsmakten, Försvarets materielverk

(FMV) och representanter från försvarsindustrin. Arbetet har avgränsats till öppen information.

VAD ÄR DIGITALA TVILLINGAR OCH METAVERSUM?

Numera är digitala tvillingar ett ISO-standardiserat begrepp (3):

“3.1.1 digital twin DTw digital representation (3.1.8) of a target entity (3.1.3) with data connections that enable convergence between the physical and digital states at an appropriate rate of synchronization”

Enligt denna standard är en digital tvilling en digital representation av en målenhet med datakopplingar som möjliggör konvergens mellan de fysiska och digitala tillstånden med en lämplig synkroniseringstakt.

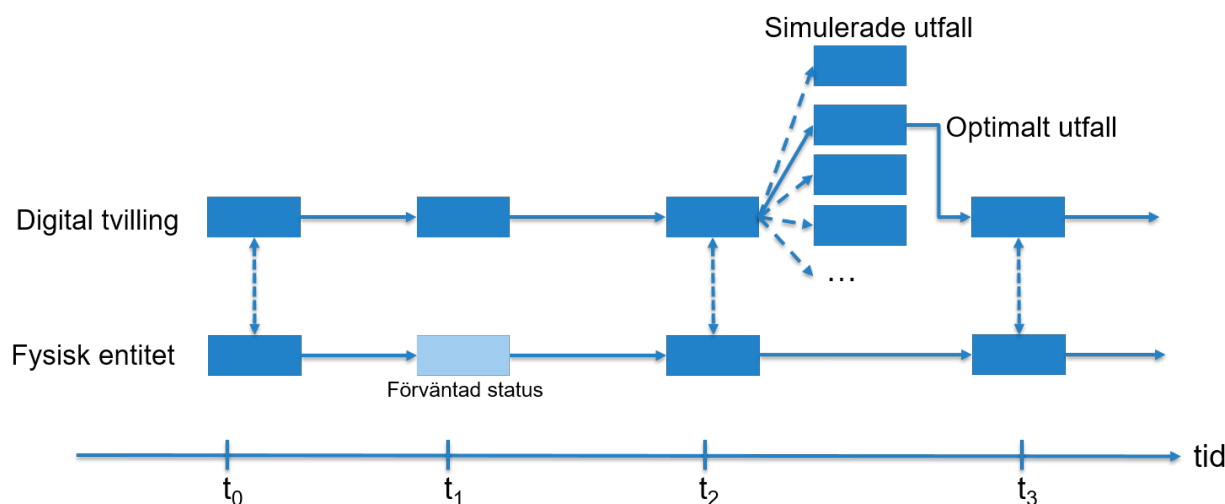
National Academies of Sciences (NAS) har utarbetat en definition (4) som ställer högre krav än ISO-standard. Man understryker vikten av den dubbelriktade kopplingen mellan det virtuella och det fysiska samt att den digitala tvillingen har en prediktiv förmåga och ger ett beslutsstöd som skapar värde.

En digital tvilling är alltså en digital motsvarighet till ett fysiskt objekt som kan vara en produkt, en process, ett system eller till och med en människa. Det måste dessutom som minimum finnas en dubbelriktad koppling mellan den fysiska och digitala tvillingen som medger synkronisering med ett lämpligt intervall. Kopplingen består av informationsöverföring. Information kan komma från sensorer som mäter aktuellt tillstånd

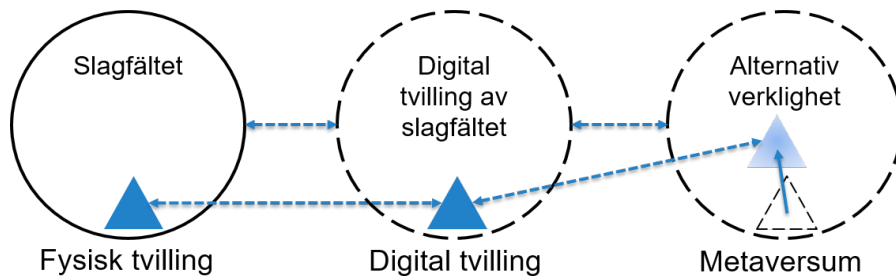
hos den fysiska tvillingen. Denna information skickas till den digitala tvillingen som uppdateras. Åt motsatt håll överförs information om exempelvis justeringar av parametrar hos den fysiska tvillingen som ger optimerad prestanda utifrån historisk och prognostiserad drift. Digitala tvillingar används för exempelvis obemannade farkoster, flygplan, bilar, människor, industriella tillverkningslinor, byggnader, städer, miljöer och väder. Begreppet digital tvilling har blivit ett modeord och det är inte alltid som det som kallas för en digital tvilling faktiskt är det i enlighet med definitionerna ovan, vilket också påpekas av NAS (4).

Ofta framhålls att den digitala tvillingen är en realtidsrepresentation av den fysiska motsvarigheteten. Den digitala tvillingen kan i realiteten innehålla även historisk samt prognostiserad eller simulerad information om möjliga framtider för den fysiska tvillingen, vilket visas konceptuellt i Figur 1. Prognostiserad information om den fysiska entiteten kan användas till exempelvis förebyggande underhåll eller vid tillfälligt bruten kommunikation med den fysiska entiteten. Simulerad information kan ge beslutsunderlag för vilka handlingsalternativ som är mest fördelaktiga.

För metaversum (*metaverse*) saknas ännu en etablerad definition, men det kan ses som en samlingsterm för en virtuell värld för interaktion. Det förekommer att man skiljer på begreppet metaversumet (*the Metaverse*) som kan ses som en mer allomfattande virtuell värld



Figur 1. Exempel på förhållandet mellan en fysisk tvilling och dess digitala motsvarighet i olika tidsperspektiv. Vid tiden t_0 sker synkronisering mellan den digitala tvillingen och fysiska entiteten. Vid tiden t_1 har ingen synkronisering skett, till exempel på grund av att kommunikationen har brutits. Den digitala tvillingen kan här prognostisera förväntad status hos den fysiska entiteten och synkronisering återupptas därefter vid t_2 . Efter t_2 sker simulering av olika utfall för olika handlingsalternativ och det optimala alternativet väljs ut och synkroniseras med den fysiska entiteten vid t_3 . Den digitala tvillingen i t_1 kan även representera ett framtida prognostiserat tillstånd hos den fysiska tvillingen.



Figur 2. Schematisk beskrivning av fysiska och digitala tvillingar i förhållande till metaversum

och olika metaversum (*metaverses*) som mer avgränsade världar för olika ändamål. Ett metaversum kan ses som ett virtuellt alternativt universum för interaktioner som av olika anledningar inte är fördelaktiga att genomföra i verkligheten. Exempel kan vara att hålla ett virtuellt möte med deltagare som befinner sig på olika geografiska platser, eller att öva farliga eller riskabla aktiviteter i en virtuell miljö.

Roblox för spel, Siemens Xcelerator och NVIDIAs Omniverse för att skapa industriella digitala tvillingar samt Microsoft Mesh för samarbete mellan användare i virtuella rum, är alla exempel på metaversum som används idag.

Ett metaversum kan betraktas som en virtuell värld där digitala tvillingar kan visualiseras och interagera med varandra, Figur 2.

Relaterade begrepp

Det finns ett antal begrepp som relaterar till digitala tvillingar och metaversum. Nedan redovisas några vanliga exempel.

- **Digital Twin Prototype (DTP)** – En virtuell prototyp av en produkt som tillverkas och testas virtuellt innan den slutgiltiga fysiska produkten tillverkas (5).
- **Digital Twin Instance (DTI)** – En digital tvilling för ett specifikt exemplar av en tillverkad enhet där en DTP uppdateras med unik information för en individuell produkt (5).
- **Digital Twin Aggregate (DTA)** – Aggregerad information från alla DTI:er som möjliggör lärande och prediktivt underhåll (5).
- **Digital modell** – En digital tvilling utan en (kopplad) fysisk motsvarighet (6). Kan vara en DTP. Se även Modellering och simulering under kapitlet Möjliggörande tekniker nedan.
- **Digital thread** – En digital tråd är kopplingen mellan den digitala och fysiska tvillingen (5, 7).

- **Digital Shadows (DS)** – Digitala tvillingar utan kommunikation tillbaka till den fysiska miljön (8).

- **Cognitive Digital Twin (CDT)** eller *Cognitive Twin* (CT) – En digital tvilling som kan göra intelligenta analyser och dra slutsatser med hjälp av semantiska tekniker. De sistnämnda möjliggör hantering av data utifrån dess betydelse genom exempelvis ontologier och kunskapsgrafer. (8)

- **Cyber Twins** – Digitala tvillingar av digitala system, nätverk och cyberinfrastrukturer.

- **Live, virtual, and constructive** – En kombination av fysiska system med mänsklig bemanning (*live*), virtuella system med mänsklig bemanning (*virtual*), och virtuella system med simulerad bemanning (*constructive*) (9).

- **Cyberfysiska system** – En kombination av datorbaserade system och fysiska system som exempelvis maskiner och apparater för övervakning, reglering och styrning (3, 10).

- **Cyberrymden** – Synonym till metaversum (11).

Möjliggörande tekniker

Digitala tvillingar och metaversum är beroende av ett antal andra viktiga teknikområden samt även av hur dessa utvecklas och kan samverka. I detta avsnitt beskrivs möjliggörande aspekter hos de viktigaste teknikerna.

Modellering och simulering

Datamodeller används för att skapa en virtuell representation av den fysiska enheten eller processen. Dessa modeller kan vara baserade på matematiska ekvationer, fysikaliska lagar, statistisk analys eller maskininlärningsalgoritmer. Simuleringsverktyg används sedan för att simulera beteendet hos den virtuella modellen under olika förhållanden och scenarier.

Sakernas internet och sensorer

Sakernas internet (*Internet of Things*, IoT) skapar kopplingen mellan den fysiska och den digitala världen samt möjliggör överföring av data mellan dessa världar. IoT-enheter och -system är ofta integrerade med sensorer som används för att samla in data från den fysiska världen, exempelvis temperatur, tryck och rörelse.

Visualisering

För att presentera data från den digitala tvillingen på ett lättförståeligt sätt för användaren används verktyg för datavisualisering. Användargränssnitt möjliggör interaktion med den digitala tvillingen och tillåter användaren att utforska data, analysera resultat och fatta informerade beslut. Visualiseringen kan ske som virtuell verklighet (*virtual reality*, VR), förstärkt verklighet (*augmented reality*, AR) eller blandad verklighet (*mixed reality*, MR).

Molntjänster och edge-teknik

Molnbaserade tjänster (*cloud services*) används för att lagra och hantera den stora mängden data som genereras av digitala tvillingar. Datalagringstekniker används för att organisera och strukturera data på ett effektivt sätt för enkel åtkomst och analys. Eftersom molnet inte alltid är tillgängligt kan digitala tvillingar behöva agera autonomt och lokala kommunikationsmöjligheter behöva säkerställas för användarna. Det kan förekomma variationer i bandbredden och kontakten kan brytas helt eller delvis under kortare eller längre tid. För att uppnå robusthet måste såväl sensorsystem som digitala tvillingar periodvis kunna klara sig själva, representera osäkerheten i sitt tillstånd samt återhämta sig vid återupptagen kontakt. Här kan *edge*-teknik (bearbetning av data nära sensorn) spela en viktig roll för att möjliggöra kontakt med delar av systemet när molnet inte kan nås.

Artificiell intelligens

Artificiell intelligens (AI) spelar en viktig roll för digitala tvillingar genom att förbättra förmågan att analysera och dra slutsatser från den stora mängd data som genereras av dessa. Genom att tillämpa AI-tekniker som maskininlärning och djupinlärning kan digitala tvillingar automatisera processer för dataanalys och identifiera komplexa mönster och samband i data som annars skulle vara svåra att upptäcka. Dessa insikter kan sedan användas för att fatta informerade beslut, förutse framtida händelser och

optimera prestanda hos den fysiska enheten eller processen som modelleras av den digitala tvillingen (12).

Cybersäkerhet och integritet

Säkerhetsåtgärder och krypteringstekniker används för att skydda data och system från obehörig åtkomst och manipulation. Integritetsfunktioner, exempelvis med så kallad blockkedjeteknik, säkerställer att endast auktoriserade användare har tillgång till känslig information och att dataintegriteten bibehålls.

FORSKNINGSFRONTEN INOM FÖRSVAR OCH SÄKERHET

Den strukturerade litteratursökningen inom digitala tvillingar respektive metaversum inom försvar och säkerhet gav nedanstående resultat. Någon begränsning för sökningen gällande årtal för publicering gjordes inte och den tidigaste referensen publicerades 2019.

Digitala tvillingar

Litteratursökningen¹ gav 33 resultat varav två dubbletter. Av resultaten bedömdes 18 ha relevans för försvarstillämpningar och dessa sammanfattas nedan.

Tre artiklar var av översiktlig karaktär. Tillämpningsområden som nämns inom försvarsområdet är tillverkning, underhåll, utbildning och träning, logistik, övervakning och spaning, cybersäkerhet, samt beslutsstöd (13). Exempel på nuvarande tillämpningar finns inom förebyggande underhåll inom flyg, snabbare forsknings- och utvecklingscykler för vapen, feldiagnostik för satelliter och cybersäkerhet för IoT-enheter (14). Exempel på satsningar är DARPA:s 4D Digital Twin Battlefield (15). Bland framtida potential nämns här att integrera data från obemannade farkoster och sensorer samt beslutsstöd för multidomänoperationer som kan ge asymmetriska fördelar.

Ett antal artiklar handlade om olika specifika tillämpningar: Offensive Military Cyber Operations (OMCO) (16), simulering för digitala tvillingar inom främst cyberförsvar (17), logistikkedjor (18), militär UAV (19), luftförsvar (20), marina plattformar (21), militärfordon (22), flyg och försvar (23), felprediktion i militära obemannade farkoster (24), digitala tvillingar för äldre flygplanstyper (25), försvarsupphandling (26), livscykelhantering och prediktivt underhåll markfordon (27), energieffektivisering i militära byggnader (28), tillämpning inom ingenjörsvetenskap och utrustning (29) samt tillverkning av bomber (30).

¹ Google Scholar 2024-08-15, söksträng: allintitle: "digital twin" OR "digital twins" defense OR defence OR military

Metaversum

Här gav litteratursökningen² 17 resultat varav 13 hade faktisk tillämpning inom försvar och säkerhet och i 10 av dessa nämndes konkreta användningsområden enligt nedan.

En Nato-rapport (31) presenterar hur tekniker för metaversum kan påverka traditionella modellerings- och simuleringsverktyg inom bland annat förmågeutveckling, upphandling, träning och utbildning. Dessa tekniker kan potentiellt transformera militär beredskap och sammanhållning inom Nato. Metaversum inom försvar har många möjliga militära tillämpningsriktningar, inklusive vapenutveckling, utbildning, taktisk ledning och situationsmedvetenhet samt systematiska koordinerade operationer (32). Tekniken kan bidra till förbättrad utbildning av personal, förbättrat stöd till beslutsfattare i olika roller, effektivare operativ planering och mer strömlinjeformad operativ logistik (33). En annan artikel undersöker ett operativt koncept för militärt metaversum och konstaterar att tekniker för metaversum kan ge många fördelar inom olika steg inom förmågeutveckling och bidra till multidomänintegration (34). Alternativa verkligheter som inkluderar VR-, AR- och MR-teknik kan vara fördelaktiga för militären eftersom de till exempel kan förbättra militär träning och strid (35).

Ett antal produkter relaterade till metaversum för försvarstillämpningar används redan (36):

- STE (U.S. Army) – Syntetisk träningsmiljö för omslutande (*immersive*) träning för soldater individuellt eller i grupp.
- OWT (BISim) – Terrängsimuleringar med hög kvalitet
- ATARS & CARBON (Red 6) – Simulerar luftstrider med flera flygplan och virtuella fiendeflygplan med flera användare i samma digitala utrymme.
- Skyrat (Improbable) – Plattform för utveckling av syntetiska miljöer.
- SANSAR (Polish University of War Studies) – En plattform för omslutande träning i virtuella farliga miljöer
- DEIMOS (Optimus System) – Militära skytteträningsmiljöer för exempelvis precisionsskytteträning och taktisk beteendeträning.

En sydkoreansk artikel presenterar landets aktiviteter inom militär metaversum, främst gällande utbildning och träning (37). Här nämns även amerikanska försvarets aktiviteter inom VBS3 (Virtual Battlespace 3) och LVCG – träning live (Live), virtuell träning (Virtual), simulerad träning med krigsspel (Constructive) och spel (Game). Det DARPA-finansierade SIMNET (SIMulatorNETworking) och Synthetic Training Environment (STE) nämns också.

Några artiklar handlade om enskilda tillämpningar. Försvarsmetaversumet GhostPlay med AI-förstärkt icke-konventionell *red teaming* beskrivs i litteraturen (38). Quantum Superdense Coding-based Secure Authentication (QSCSA) har undersökts för bättre integritet och säkerhet i militära metaversum (39). Metaversum har även provats för militär rekrytering (40).

POTENTIAL INOM FÖRSVAR OCH SÄKERHET

Digitala tvillingar har i den civila sektorn högst mognad inom tillverkning, energi och transport (41), medan metaversum har högst mognad inom spel med ökande mognad inom utbildning och industriell användning. Mognaden inom försvar och säkerhet för båda områdena är lägre, men enligt forskningslitteraturen i föregående avsnitt pågår forskning och utveckling inom många områden och potentialen och framtida nyttan bedöms vara stor inom alla grundläggande militära förmågeområden. EDDI-studien (42) konstaterar att digitala tvillingar i försvarssektorn möjliggör dynamisk scenariomodellering, dataintegration i realtid och avancerad analys, vilka tillsammans kommer leda till innovativa funktioner som analyser och prediktivt underhåll, samt utbildningslösningar som är skräddarsydda för specifika användares behov. Enligt studien kommer dessa framsteg att ge försvarsorganisationer oöverträffade nivåer av situationsmedvetenhet, effektivitet och bidra till strategisk insikt. I en rapport beställd av MSB (43) belyses fördelar med digitala tvillingar i samhällsviktiga verksamheter. Realtidssimuleringar av samhällsviktiga verksamheter med hög kvalitet kan avsevärt förbättra situationsmedvetenhet och förmåga till krishantering. Kontinuerlig övervakning och möjlighet till förebyggande underhåll kan förbättra den operativa effektiviteten och säkerheten för kritisk infrastruktur. Integration av realtidsdata med digitala tvillingar kan stödja robust strategisk planering där stora osäkerheter hanteras och göra det möjligt för organisationer att förutse och anpassa sig till potentiella störningar på ett effektivt sätt. Digitala tvillingar skulle kunna möjliggöra bättre samordning

² Google Scholar 2024-08-16, söksträng: allintitle: "metaverse" OR "meta verse" defense OR defence OR military

mellan olika intressenter som är involverade i hanteringen av samhällsviktiga verksamheter. Detta främjar mer enhetliga och effektiva handlingsstrategier under nödsituationer.

REKOMMENDATIONER FRÅN WORKSHOP

Under den workshop som arrangerades av författarna diskuterade deltagare från FOI, Försvarmakten, FMV och representanter från försvarsindustrin områdena digitala tvillingar och metaversum. Fokusfrågan för workshoppen var vad som är försvarsspecifikt inom digitala tvillingar och metaversum, det vill säga vilka frågor som aktörer inom försvarssektorn, särskilt Försvarmakten, behöver driva som den civila sektorn inte nödvändigtvis kommer att driva eller utveckla. Deltagarna fick också rangordna rekommendationerna från 1 (högst prioritet) till 3 (lägst prioritet) och resultaten sammanfattas nedan.

Prioritet 1:

Identifiera behov – Klargör ett tydligt (militärt) behov och konkretisera den förväntade nyttan, som exempelvis effektivisering i tid, kostnad eller undvikande av farliga miljöer. Identifiera enkla behov, lågt hängande frukter, som kan användas för att testa koncept (*proof-of-concept*) som i sin tur kan skapa acceptans och bidra till lärande. Det behöver inte alltid vara uttömmande modeller utan man kan fokusera på stora och dyra komponenter som kräver mycket underhåll. Kravställ utveckling av digitala tvillingar i materielanskaffning.

Prioritet 2:

Hantera säkerhet – Identifiera vad som specifikt behöver hanteras för digitala tvillingar och metaversum sett i ett försvarsssekretessperspektiv. Det kan behövas ett mjukvaruramverk som man kan utgå ifrån vid kravställning till leverantörer. Det kan även behövas modeller och ramverk för att hantera riskerna med digitala tvillingar. Med tanke på komplexiteten med digitala tvillingar kan det behövas kompetensutvecklande insatser för personalen. De stora mängderna data som genereras och hanteras kan kräva ett nytt synsätt kring sekretessklassning och informationsvärdering. Exempelvis kan tidsbegränsad klassning av data leda till att avklassificerad information aggregeras och tillsammans blir skyddsvärd.

Etablera infrastruktur – Börja bygga en egen fristående infrastruktur och etablera en testmiljö – ”battlelab” – och ett eget moln för datalagring. Kompetensförsörjning behöver ske i form av utbildning och rekrytering inom digitala tvillingar och metaversum. Samverkan behöver ske inom hela försvarssektorn eftersom Försvarmakten inte kan göra allt själva.

Prioritet 3:

Övriga rekommendationer – Bland övriga försvarsspecifika frågor att beakta nämndes att digitala tvillingar och metaversum kan ge beslutsstöd i kritiska situationer (avseende rum, tid och resurser), ofta på liv och död. Vidare konstaterades att ett etiskt ramverk behövs för skjutande automatiska system. Det diskuterades att den civila utvecklingen ofta kan följas och existerande system anpassas till militära behov. Generellt gäller att det är vilken data som används som ställer krav på sekretess och handhavande. Vissa system som stridsflyg och ubåtar är dock försvarsspecifika och behöver hanteras i egen regi. Digitala tvillingar kan även skapas för existerande system som används redan idag för att utnyttja fördelarna med digitala tvillingar även för dessa. Försvarmakten vet sina egna militära behov men personal kan behöva utbildas för att se möjligheterna med digitala tvillingar och metaversum. En stor utmaning är att integrera försvarsgrenar och domäner i ett komplext system-av-system. Det konstateras att digitala tvillingar kan stödja validering och ackreditering samt att standardisering av dataformat och modeller krävs inom Nato för att säkerställa interoperabilitet. Ett konkret förslag som lyftes var att etablera ett forskningsområde på FOI (FoT-område) inom modellering och simulering med en inriktning mot digitala tvillingar och metaversum.

Under workshoppen diskuterades att man också kan se digitala tvillingar som ett sätt att organisera sin verksamhet, bygga system och lösa problem. Digitala tvillingar och metaversum skulle kunna utgöra grunden, en plattform, för en dynamisk realtidslägesbild för beslutsfattare från olika aktörer (civila och militära) på olika nivåer. Detta skulle i så fall förutsätta ett gemensamt språk. ■

Roger Bodén (Tekn.dr) är analytiker vid FOI:s avdelning Försvarsanalys.

Cecilia During (M.Sc.) är analytiker vid FOI:s avdelning Försvarsanalys.

LITTERATUR

1. Lindberg, A., G. Kindvall, and E. Dalberg, *Nya ämnen för avskanning - resultat från 2023 års urvalsprocess*, in FOI Memo 8213. 2023, Totalförsvarets forskningsinstitut (FOI).
2. Lindberg, A., et al., *A utility focused process for enhancing the use of horizon scanning in defence research*, in FOI-R--5149--SE. 2021, Totalförsvarets forskningsinstitut (FOI).
3. The International Electrotechnical Commission (IEC), *ISO/IEC 30173 Digital twin – Concepts and terminology*. 2023.
4. National Academies of Sciences, E., et al., *The National Academies Collection: Reports funded by National Institutes of Health, in Foundational Research Gaps and Future Directions for Digital Twins*. 2024, National Academies Press (US): Washington (DC).
5. Grieves, M., *Digital Twins: Past, Present, and Future*. 2023. p. 97-121.
6. Wright, L. and S. Davidson, *How to tell the difference between a model and a digital twin*. Advanced Modeling and Simulation in Engineering Sciences, 2020. 7(1): p. 13.
7. *Digital Engineering and Modeling Practices (MIL-HDBK-539)*, DoD, Editor. 2022: <https://assist.dla.mil>.
8. Karabulut, E., et al., *Ontologies in digital twins: A systematic literature review*. Future Generation Computer Systems, 2024. 153: p. 442-456.
9. Lemmers, A.P., Bastiaan LVC for Joint and Combined Air Power, in *Emerging and Disruptive Modelling and Simulation Technologies to Transform Future Defence Capabilities*. 2022, NATO Science and Technology Organization: Bath, United Kingdom.
10. Computer Sweden. *Cyberfysiska system*. [cited 2025 23/4]; Available from: <https://it-ord.computersweden.se/ord/cyberfysiskt-system/>.
11. Computer Sweden. *Cyberrymden*. [cited 2025 23/4]; Available from: <https://it-ord.idg.se/ord/metaversum/>.
12. Tao, F., et al., *Data-driven smart manufacturing*. Journal of Manufacturing Systems, 2018. 48: p. 157-169.
13. Kang, I. and J. Oh, *Review of the Application of Digital Twins to Defense*. Journal of Digital Contents Society, 2024. 25(2): p. 383-393.
14. Mendi, A.F., T. Erol, and D. Dogan, *Digital Twin in the Military Field*. IEEE Internet Computing, 2022. 26(5): p. 33-40.
15. Wang, J., et al. *The Advancements and Prospects of Digital Twin Technology in the Military Domain*. in *Lecture Notes in Electrical Engineering*. 2024.
16. Maathuis, C. *An Outlook of Digital Twins in Offensive Military Cyber Operations*. in *4th European Conference on the Impact of Artificial Intelligence and Robotics, ECIAIR 2022*. 2022.
17. Aggarwal, K., et al., *Enabling Elements of Simulations Digital Twins and its Applicability for Information Superiority in Defence Domain*. 2022.
18. Sani, S., D. Schaefer, and J. Milisavljevic-Syed. *Utilising Digital Twins for Increasing Military Supply Chain Visibility*. in *Advances in Transdisciplinary Engineering*. 2022.
19. Wang, Y.C., et al. *Research on Digital Twin Framework of Military Large-scale UAV Based on Cloud Computing*. in *Journal of Physics: Conference Series*. 2021.
20. Liu, Q.S. *Research on the application of digital twin technology in air defense system*. in *2024 5th International Conference on Computer Engineering and Application, ICCEA 2024*. 2024.
21. Silvera, J., et al., *Navantia's Digital Twin Implementation Perspective in Military Naval Platform Life Cycle*. North Atlantic Treaty Organization Science and Technology Organization, 2020.
22. Pierri, L., *Design of the HUMS of a military vehicle based on a digital twin and artificial intelligence algorithms*. 2019.
23. Forward, G., *Digital Twin/Digital Thread Solution Definition for Aerospace and Defense: Phase 2*. 2022.
24. Heron, J., et al., *Digital Twin for In-Line Fault Prediction in Military Unmanned Vehicles*, in *AVT-356 Research Symposium on Physics of Failure for Military Platform Critical Subsystems*. 2022: Online.
25. Raming, M., et al., *A-10 and the Path to the Digital Twin for Legacy Defense Systems*, in *AVT-369 Research Symposium on "Digital Twin Technology Development and Application for Tri-Service Platforms and Systems"*. 2023: Båstad, Sweden.
26. Jones, R., *Improved Forecasting of Defense Acquisition Program Performance Using Digital Twin Models of a Revenue Centric Versus Cost Centered Approach (Enhanced Earned Value Management (E2VM))*. 2024, Acquisition Research Program.
27. Eddy, C.W., *Digital Twin in Military Ground Vehicles: Design and Predictive Maintenance*. 2024, Clemson University.
28. Marchione, P. and F. Ruperto, *Prototyping a digital twin. a case study of a "u-shaped" military building*. International Journal of Energy Production and Management, 2022. 7(1): p. 83-94.
29. Li, S., et al. *Preliminary Study on the Application of Digital Twin in Military Engineering and Equipment*. in *Proceedings - 2020 Chinese Automation Congress, CAC 2020*. 2020.
30. Hosaka, N.J., *The Use of Digital Twins to Achieve Military Manufacturing Excellence*. 2024, Purdue University Graduate School.
31. Solly, R. and J. McArdle, *Unlocking the military potential of the metaverse*, in *The NATO Modelling and Simulation Group MSG-197 "Symposium on Emerging and Disruptive Modelling and Simulation Technologies to Transform Future Defence Capabilities"*. 2023: Bath, United Kingdom.
32. Zhang, Z., et al., *Military Metaverse: Key Technologies, Potential Applications and Future Directions*. Journal of System Simulation, 2023. 35(7): p. 1421-1437.
33. Blowers, M., N. Jaimes, and J. Williams. *Benefits and challenges of a military metaverse*. in *Disruptive Technologies in Information Sciences VII*. 2023. SPIE.
34. Fawkes, A. and N. Cheshire, *Military Metaverse CONOPS*. 2023.
35. Bunnag, K., *Alternate "Realities": Military Applications in the Metaverse Era*. Defence Technology Academic Journal, 2023. 5(11): p. 26-37.
36. Zhao, T., et al., *Metaverse Concept and Its Military Application*. Journal of System Simulation, 2023. 35(7): p. 1405-1420.
37. Jung, M.-S., et al., *A study on the military use of the new future battlefield environment metaverse*. The Journal of the Convergence on Culture Technology, 2022. 8(2): p. 179-185.
38. Borchert, H., T. Schütz, and C. Brandhuber, *Leveraging the Defense Metaverse. Unlocking the Power of AI for Force Development*. The Air Power Journal, 2023. 3: p. 23-32.
39. Tuli, E.A., et al. *Quantum superdense coding-based secure authentication for military metaverse*. in *Korea Communications Society Conference Proceedings*. 2024.
40. Yoo, H.Y., *A Study on Military Job Fair using the Metaverse Platform Focusing on ZEPETO*. Korean Society For Computer Game, 2023. 36(3): p. 53-59.
41. Botín-Sanabria, D.M., et al., *Digital Twin Technology Challenges and Applications: A Comprehensive Review*. Remote Sensing, 2022. 14(6): p. 1335.
42. Masini, A., *D1.3: Workshop Supporting Document - REPORT*. 2024, Service Framework Contract for the provision of "Explore Defence Digital Twins" (EDDI).
43. Bucaioni, A., J. Axelsson, and M. Behnam, *Knowledge Review on Digital Twins for Essential Services*. 2024: Mälardalens universitet

